

Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir



Research Article
Vol. 19, No. 5, Dec.-Jan. 2023, p. 723-743

Evaluation of the Fouling Phenomenon During Membrane Clarification of Apple Juice Using Scraped Surface Membrane Unit

S. Yassari[1], H. Mirsaeedghazi[2*], L. Roozbeh Nasiraie[3], A. Fadavi[4]

1 and 3- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran, respectively.
2 and 4- Associate Professors, Department of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Pakdasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: mirsaeed@ut.ac.ir)

Received: 2022.11.29 Revised: 2023.03.08 Accepted: 2023.04.17 Available Online: 2023.04.25	**How to cite this article:** Yassari, S., Mirsaeedghazi, H., Roozbeh Nasiraie, L., & Fadavi, A. (2023). Evaluation of the fouling phenomenon during membrane clarification of apple juice using scraped surface membrane unit. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 19*(5), 723-743. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79693.1217

Introduction

As a useful fruit for humans, apple (*Malus domestica*) is a good sourceof antioxidants, minerals, ascorbic acid, vitamins, polyphenols, fibers and other essential elements with medicinal properties. Improving the storage time of apple juice and maintaining the stability of extracts with high Brix value (during transportation and storage) and its marketability by removing the remaining water as well as reducing the turbidity, viscosity and brown color caused by colloidal suspended solids. Large (pectin, protopectin, pigments, polymeric carbohydrates, tannin, starch, cellulose, hemicellulose, fibers, etc.) is of great importance. Due to the presence of colloidal suspended solid particles and compounds that settle over time (mold, bacteria, plant cell fragments, pectin-tannin complex), apple juice must be clarified before concentration. Due to the high-energy consumption, time-consuming, degradation of thermo-sensitive components, and reduction of nutritional value in traditional methods, recently, the use of membrane concentration in food and beverage production holds great potential.. Despite all the benefits of membrane processes, one of the critical problems is permeate flux decline due to the concentration polarization and membrane fouling. In this study, an innovative mechanical motion was developed to remove the cake deposits on the membrane surface towards mitigating adverse effects of polarization and fouling.

Materials and Methods

Membrane scraped surface module was designed and made with polyethylene material. The membrane was enclosed between the lower and upper parts of the module. These two parts are connected with screws and create a cylindrical part. Also, two caps are pressed axially to this cylindrical part by a metal frame to eliminate any unwanted leakage. The rotor shaft was coupled with an electric motor and the rotation of the output shaft was regulated by an inverter. A pump transferred the fresh fruit juice to the module through the inlet port and then it was divided into two output streams, permeate and retentate. The permeate was collected from the bottom of the module for further investigation and the retentate was returned to the juice tank. A polyethersulfone (PES) membrane with molecular weight cut-off (MWCO) of 4 kDa was used to clarify apple juice. Effects of the blade rotation speed (0, 600, 1400 and 2200 rpm), transmembrane pressure (TMP) (0.5, 1 and 1.5 bar), feed flow rate (FFR) (10, 15 and 20 ml/s) and the distance of the blade from the membrane surface (2 and 5 mm) on volumetric concentration factor (VCF) and fouling phenomenon were evaluated.

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79693.1217

Hermia model was used to study the main fouling mechanism and it was verified by scanning electron microscopy (SEM) images.

Results and Discussion

Results showed that rotating the blade with speed of 600 rpm at TMP of 0.5 bar, FFR of 10 ml/s and 2 mm distance from the membrane surface had the best performance in VCF and reducing fouling. The main mechanism of fouling was cake formation. Rotation of the blade decreases the intensity of cake formation and its thickness on the membrane surface and enhances the standard pore blocking. Also increasing the blade rotation speed changes the main fouling mechanism to the standard pore blocking due to the cake disintegration on the membrane surface and the penetration of fine particles into the membrane pores. As a result, the rotation of blade had a significant positive effect on increasing the VCF. On the other hand, the total resistance decreased with the rotation of the blade and by increasing the distance of blade from the membrane surface, the intensity of cake formation reduced. Also, the SEM images showed that in without blade rotation mode, the accumulation of cake particles on the membrane surface is thicker and denser than in with blade rotation mode. On the other hand, the low thickness of the cake layer formed on the membrane surface in the process of blade rotation is due to the turbulences resulting from the rotating blade. These observations confirm the results of the Hermia model in the previous sections.

Conclusion

In conclusion, the TMP 0.5 bar, FFR of 10 ml/s, blade rotation speed of 600 rpm with a distance of 2 mm from membrane surface were considered as the best conditions for ultrafiltration of apple juice using scraped-surface membrane unit.

Keywords: Apple juice, Concentration polarization, Fouling, Membrane clarification, Scraped surface, VCF



نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir



مقاله پژوهشی

جلد ۱۹، شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۲ ص. ۷۴۳-۷۲۳

مطالعه پدیده گرفتگی در شفاف‌سازی غشایی آب سیب به کمک سامانه غشایی سطح تراش

سیما یساری[۱]- حسین میرسعیدقاضی[۲]*- لیلا رزوبه نصیرایی[۳]- علی فدوی[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

چکیده

شفاف‌سازی آب میوه جهت بهبود خواص فیزیکوشیمیایی و بازارپسندی مهم است. به دلیل مصرف بالای انرژی، زمان‌بر بودن، تخریب ترکیبات حساس به حرارت و کاهش ارزش تغذیه‌ای در روش‌های سنتی، امروزه برای شفاف‌سازی آب میوه فرآیندهای غشایی به کار گرفته شده است. یکی از مشکلات مهم فرآیندهای غشایی، کاهش شار تراوه ناشی از قطبش غلظتی و گرفتگی غشا می‌باشد. در این مطالعه، یک روش مکانیکی جدید برای ایجاد تلاطم در جریان به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب قطبش غلظتی و گرفتگی غشا ایجاد شد. بدین منظور، از غشا اولترافیلتر با جنس پلی‌اتر سولفون (PES[۴]) و حد وزن مولکولی (MWCO[۵]) ۴ کیلو دالتون درون سامانه غشایی با تیغه‌های تراشنده سطح جهت شفاف‌سازی آب سیب استفاده شد. اثر پارامترهای عملیاتی شامل سرعت دوران تیغه‌ها (۰، ۶۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ دور بر دقیقه)، فشار (TMP[۶]) (۰/۵، ۱ و ۱/۵ بار)، سرعت جریان[۷] (FFR) (۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌لیتر بر ثانیه) و فاصله تیغه از سطح غشاء (۲ و ۵ میلی‌متر) بر فاکتور غلظت حجمی (VCF[۸])، مقاومت گرفتگی، زمان وقوع هر کدام از مکانیسم‌های گرفتگی و مورفولوژی لایه کیک بررسی شد. طبق نتایج انجام فرایند در فشار ۰/۵، سرعت جریان ۱۰ میلی‌لیتر بر ثانیه، سرعت دوران تیغه‌ها ۶۰۰ دور بر دقیقه و فاصله ۲ میلی‌متری تیغه‌ها از سطح غشا بهترین تأثیر را بر VCF و کاهش گرفتگی داشت. مکانیسم اصلی گرفتگی در فرآیند، تشکیل لایه کیک بود. چرخش تیغه‌ها شدت تشکیل لایه کیک و ضخامت آن بر سطح غشا را کاهش داده و منجر به افزایش سهم گرفتگی استاندارد شد.

واژه‌های کلیدی: آب سیب، شفاف‌سازی غشایی، سامانه سطح تراش، قطبش غلظتی، گرفتگی، فاکتور غلظت حجمی

مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از بزرگترین تولیدکنندگان سیب با تولید بیش از ۵٪ سیب جهان، سالانه حدود ۲۰۹۶۷۴۹ تن سیب را تأمین می‌کند (FAO, 2017). سیب (*Malus domestica*) به‌عنوان یک میوه مفید برای سلامت انسان‌ها حاوی منابع غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها، مواد معدنی، اسید آسکوربیک، ویتامین‌ها، پلی‌فنل‌ها، فیبرها و سایر عناصر ضروری با خواص دارویی هست (Candrawinata *et al*., 2013 Khanali *et al*., 2020;). بهبود مدت زمان انبارداری آب سیب و حفظ پایداری عصاره‌ها با ارزش بریکس بالا (طی حمل و نقل و ذخیره‌سازی) و بازارپسندی آن، از طریق حذف آب باقیمانده همچنین کاهش کدورت،

۱ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکترای تخصصی علوم و مهندسی صنایع غذایی و استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد واحد نور، نور، ایران
۲ و ۴- دانشیاران گروه فناوری صنایع غذایی، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mirsaeed@ut.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79693.1217

4- Polyether sulfone
5- Molecular weight cut off
6- Trans membrane pressure
7- Feed flow rate
8- Volumetric concentration factor

ویسکوزیته و رنگ قهوه‌ای تیره ناشی از مواد جامد معلق کلوییدی بزرگ (پکتین، پروتوپکتین، رنگدانه‌ها، کربوهیدرات‌های پلیمریک، تانن، نشاسته، سلولز، همی سلولز، فیبرها و ....) از اهمیت زیادی برخوردار است (Bhattacharjee *et al.*, 2017a; Onsekizoglu *et al.*, 2010). به دلیل وجود چنین ذرات جامد معلق کلوییدی و ترکیباتی که با گذر زمان ته‌نشین می‌شوند (همی‌سلولز، پروتئین، قطعات سلول گیاهی، کمپلکس پکتین- تانن) آب سیب باید قبل از تغلیظ، شفاف‌سازی شود (Massini *et al.*, 2018; Ahmad *et al.*, 2020). روش‌های مرسوم شفاف‌سازی آب میوه‌ها پیش تیمار آنزیمی، تبخیر حرارتی و تشکیل لخته توسط مواد کمکی و پکتین‌زدایی است (Gulec *et al.*, 2017; Onsekizoglu *et al.*, 2010; Ahmad *et al.*, 2020). با این حال، مصرف بالای انرژی، زمان‌بر بودن، سختی کار، تخریب اجزای حساس به حرارت نظیر ترکیبات فنولی و رنگدانه، تغییرات عطر و طعم و کاهش ارزش غذایی از معایب اصلی روش‌های فوق می‌باشد (Bahçeci, 2012). در سال‌های اخیر، از فن‌آوری جداسازی غشایی جهت شفاف‌سازی آب میوه‌ها به صورت موفقیت آمیزی استفاده شده‌است. جداسازی غشایی به دلیل کیفیت بالای محصول، بهره‌وری بالا و عملکرد آن در دمای محیط می‌تواند تاثیر مثبتی بر مصرف انرژی و کاهش هزینه عملیاتی داشته باشد (Castro-Muñoz *et al.*, 2018).

فراپالایش (UF[1]) یکی از فن‌آوری‌های غشایی با نیروی محرکه فشار است که می‌تواند به‌منظور شفاف‌سازی آب میوه استفاده شود (Cai *et al.*, 2020). محدودیت اصلی فرآیند UF کاهش شار تراوه به دلیل قطبش غلظتی و گرفتگی غشا می‌باشد (Ilame and Singh, 2015; Castro-Muñoz *et al.*, 2018). گرفتگی منجر به کاهش نفوذپذیری غشا و همچنین نیاز به تمیز کردن و تعویض مکرر غشا می‌گردد و در نتیجه افزایش هزینه عملیاتی یا کاهش بهره‌وری را در پی خواهد داشت (Castro-Muñoz *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2021 Dornier *et al.*, 2018;).

در طول چند دهه‌ی گذشته، تلاش‌های متعددی برای بهبود کارایی و کاهش گرفتگی غشا در شفاف‌سازی آب میوه از جمله روش‌های شیمیایی- قلیایی/اکسیدانی (Cheng *et al.*, 2021)، پیش‌تیمار آنزیمی پکتینولیتیک آب میوه‌ها (Gokmen and Cetinkaya, 2007 ; Echavarrı´a *et al.*, 2011)، روش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده است (Zarouk *et al.*, 2020 Zhang *et al.*, 2017;).

مطالعات متعددی انجام شده است که تاثیر فرآیندهای غشایی مختلف با مدول‌های غشایی گوناگون بر فراوری آب سیب را بررسی نموده و پارامترهای عملیاتی و پدیده گرفتگی را مورد ارزیابی قرار داده است (جدول ۱). به‌عنوان مثال، فوکوموتو و همکاران (Fukumoto *et al.*, 1998) از فرآیندهای میکروفیلتراسیون با غشا با اندازه منافذ ۰/۲ میکرومتر و فراپالایش با غشاهایی از جنس سرامیکی با اندازه منافذ ۰/۰۲ میکرومتر در ماژول لوله‌ای برای شفاف‌سازی آب سیب استفاده نمودند و گزارش کردند که غشاهای UF تحت شرایط بهینه (فشار ۴۱۴ کیلوپاسکال، سرعت ۸ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سلسیوس) منجر به شار بیشتر و گرفتگی غشایی کمتر در مقایسه با غشاهای MF[2] (میکروفیلتراسیون) شد. ولادیساولیویچ و همکاران (Vladisavljević *et al.*, 2003) تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند سرعت جریان (FFR)، فشار (TMP) و دما را بر مقاومت گرفتگی طی شفاف‌سازی آب سیب با استفاده از غشاهای سرامیکی UF ارزیابی کردند. نتایج نشان داد هر دو مقاومت کل و مقاومت گرفتگی با افزایش FFR کاهش یافت؛ زیرا افزایش FFR ضریب انتقال جرم را افزایش داده و قطبش غلظتی و تجمع رسوب باقیمانده در سطح غشا را کاهش داد. تغلیظ آب سیب با استفاده از غشاهای مختلف نانوفیلتراسیون (NF[3]) در ماژول لوله‌ای و صفحه‌ای در فشارهای پایین (۸-۱۲ بار) توسط وارچوک و همکاران (Warczok *et al.*, 2004) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که گرفتگی غیر قابل برگشت آب سیب نسبتا کم است. دبروین و همکاران (de Bruijn *et al.*, 2006) مطالعه‌ای را برای تجزیه و تحلیل مکانیسم‌های گرفتگی طی فرایند UF آب سیب انجام دادند. آنها دریافتند که وقتی فرآیند UF تحت TMP ۱۵۰ کیلوپاسکال و FFR ۷ متر بر ثانیه انجام می‌شود با کاهش تدریجی لایه کیک همراه است. اما در این مورد TMP نباید از فشار بحرانی تجاوز کند. همچنین شار بحرانی نباید بیشتر از $250\ Lm^{-2}h^{-1}$ باشد. در این شرایط محققان نوع جدیدی از گرفتگی را توصیف کردند که در آن مسدود شدن منافذ غشایی در دهانه‌ی منافذ و تشکیل لایه کیک در سطح غشا بطور همزمان اتفاق می‌افتد. این نوع مدل گرفتگی پیش‌بینی می‌کند که تشکیل لایه کیک در FFR ۷/۴ متر بر ثانیه و TMP ۱۵۰ کیلو پاسکال یا FFR ۷ متر بر ثانیه و TMP ۱۲۰ کیلو پاسکال انجام نمی‌شود. تحت چنین شرایطی گرفتگی داخلی غشا تنها مکانیزمی بود که شار نفوذی را کاهش می‌داد. ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2014) فرآیند فراپالایش با یک غشا سرامیکی و اندازه منافذ ۰/۰۵ میکرومتر همراه با روش فرایند فشار بالا (HPP[4]) در فشار ۵۰۰ مگاپاسکال به‌مدت ۶ دقیقه و روش دمای بالا-زمان کوتاه (HTST[5]) در دمای ۱۱۰°C به مدت ۸/۶ ثانیه برای آب سیب تازه را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها

1- Ultrafiltration
2- Microfiltration
3- Nanofiltration

4- High-pressure processing
5- High-temperature short time

گزارش کردند که UF+HPP می‌تواند به‌عنوان تیمار بهتری برای فراوری آب سیب استفاده شود. سرکار (Sarkar, 2015) از یک سیستم فراپالایش با غشا پلی‌اتر سولفون با حد وزن مولکولی ۳۰ کیلو دالتون با کمک میدان الکتریکی برای بررسی اثر میدان الکتریکی جریان مستقیم (DC[1]) بر شار نفوذی آب سیب تیمار شده با آنزیم استفاده کرد. آنها افزایش شار ٪ ۳۵/۸ را با اعمال میدان الکتریکی ۴۰۰ ولت بر متر برای مقادیر ثابت سرعت جریان ۰/۷۵ متر بر ثانیه مشاهده کردند. همچنین در فشار انتقال غشایی ۵/۵۲ بار شفافیت آب سیب بطور قابل توجهی افزایش یافت. زروک و همکاران (Zarouk *et al.*, 2020) به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر بازده و مکانیسم گرفتگی طی شفاف‌سازی غشایی آب انار پرداختند. در این روش از ترکیب سامانه تولید میدان مغناطیسی و میکروفیلتراسیون جهت کاهش گرفتگی غشا استفاده شد. نتایج آنها نشان داد، میدان مغناطیسی می‌تواند میزان مقاومت کل غشا را تا حدود ٪۵۰ کاهش دهد. با توجه به تجزیه و تحلیل مکانیسم گرفتگی غشا در ابتدای فرآیند، با افزایش شدت میدان مغناطیسی گرفتگی‌های میانی و استاندارد مکانیسم غالب بودند اما با گذر زمان تشکیل لایه کیک مکانیسم غالب شد.

محققان از فن‌آوری فراپالایش با کمک ماژول دیسکی دوار (RDM[2]) برای فراوری آب کاسنی، آب چغندر قند، آب یونجه، تغلیظ عصاره قهوه، پروتئین شیر، بازیابی مخمر، نوشیدنی‌های الکلی، تولید آب آشامیدنی و فاضلاب لبنیات استفاده کردند (Laurio *et al.*, 2021; Szerencsés *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2013, 2016; Zhang *et al.*, 2017). در این روش که لایه نگهدارنده غشا به صورت مکانیکی حرکت داده می‌شود، در مایعات نزدیک سطح غشا باعث ایجاد سرعت برشی بالاتر می‌شود. در مقایسه با فرآیندهای غشایی مرسوم، این روش می‌تواند شدت جداسازی را با برداشتن عوامل گرفتگی و حذف آنها از سطح غشا افزایش دهد و منجر به کاهش موثر لایه پلاریزاسیون غلظتی و گرفتگی غشا شود (Szerencses *et al.*, 2021). ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2014) روش RDM به کمک فیلتراسیون ته بسته (مخزن ۱۸۰ میلی لیتر) را با روش RDM به کمک غشا UF ۵۰ کیلو دالتون برای شفاف‌سازی آب کاسنی مقایسه کردند، روش اول تحت شرایط بهینه TMP ۳/۳۴ بار و سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور در دقیقه از لحاظ فیلتراسیون بهتر عمل کرده است، و مزایایی نظیر خلوص بیشتر با شار تراوه $L.m^{-2}h^{-1}$ ۱۶۷/۹، انرژی ویژه $kwh.m^{-3}$ ۱۶۹/۴، نسبت کاهش حجم (VRR[3]) و کدورت کمتر (۲/۴ NTU) داشت و منجر به کاهش گرفتگی غشا شد. همچنین آنها دریافتند که در روش RDM به کمک فراپالایش گرفتگی دو مرحله‌ای بود، گرفتگی در مرحله اول سرعت پایینی داشت و در مرحله دوم سرعت بالاتری داشته و به سمت تشکیل لایه کیک پیش رفت. در نتیجه در میان فن‌آوری‌های توسعه یافته، سامانه‌های فراپالایش با کمک RDM نسبت به بقیه تکنولوژی‌ها بهتر بوده، چون هزینه عملیاتی UF را کاهش داده و اثرات نامطلوب گرفتگی غشایی را کم می‌کند (Luo *et al.*, 2013).

همانگونه که اشاره شد پدیده گرفتگی غشا مهمترین چالش در برابر صنعتی شدن فرایند شفاف‌سازی غشایی آب میوه‌ها است و علی‌رغم مطالعات مختلفی که در راستای کاهش آن صورت پذیرفته، استفاده محدودی از فنون مکانیکی برای جلوگیری از این پدیده شده است. مشابهت مشکل گرفتگی در سامانه‌های غشایی و معظل گرفتگی در مبدل‌های حرارتی باعث شد نویسندگان مقاله حاضر به فکر استفاده از ایده مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی سطح تراش به منظور کاهش گرفتگی در سامانه‌های غشایی افتاده و اقدام به طراحی و ساخت سامانه غشایی سطح تراش بنمایند. البته ماهیت متفاوت سامانه نظیر ورودی خروجی‌های متفاوت و لزوم آب‌بندی سامانه طراحی شده پس از نصب غشا، طراحی و ساخت آن را از آنچه در خصوص مبدل‌های حرارتی سطح تراش انجام شد، متمایز می‌نمود. لذا در این تحقیق، با الهام از مبدل‌های حرارتی سطح تراش، سامانه غشایی سطح تراش طراحی و ساخته شد. این سامانه به جهت داشتن یکسری تیغه‌های تراشنده برای افزایش آشفتگی جریان جهت کاهش پلاریزاسیون غلظتی و گرفتگی غشا و در نهایت بهبود فرآیند شفاف‌سازی غشایی آب سیب استفاده شد و پدیده گرفتگی در حین فرایند مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. همچنین اثر عملیاتی پارامترهای مختلف مانند سرعت چرخش تیغه‌ها، FFR، TMP و فاصله تیغه از سطح غشا بر مقاومت‌های گرفتگی و مکانیسم آنها در طول فراپالایش آب سیب مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی آب سیب

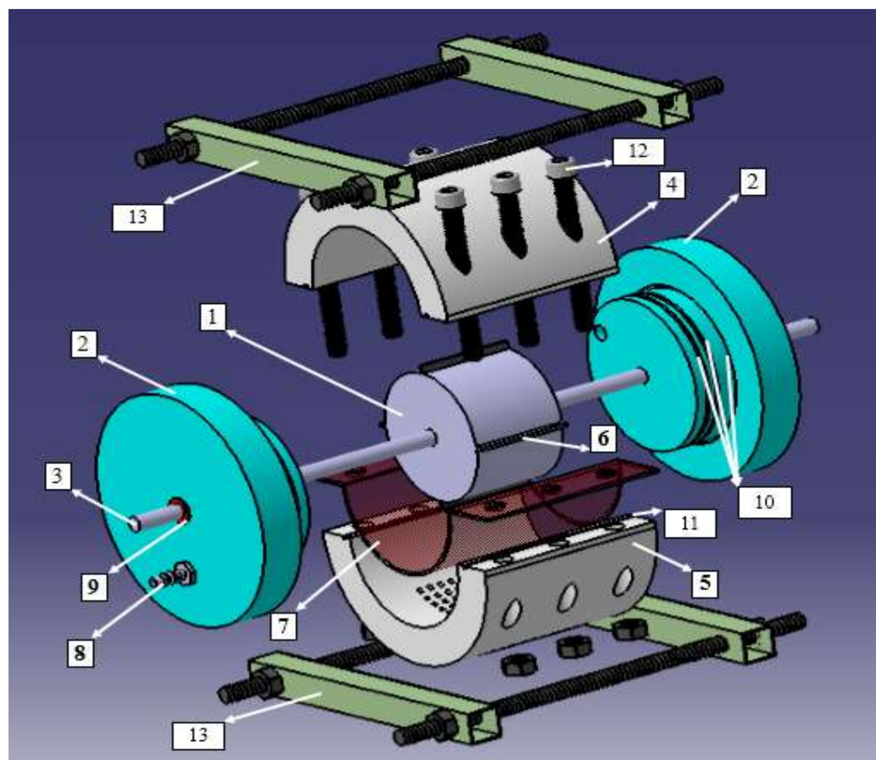
سیب تازه (واریته گرانتی اسمیت) از بازار محلی تهران تهیه شد و پس از شستشوی کامل و پوست‌گیری، آب آن توسط دستگاه آبمیوه گیری خانگی (Parskhazar, model Tiger, Iran) استخراج شد.

1- Direct current
2- Rotating disk module
3- Volume reduction ratio

جدول ۱- مطالعات انجام شده در مورد فرآیندهای غشایی آب سیب

Table 1- Literature review on the membrane processing of apple juice

Membrane system سیستم غشایی	Membrane type نوع غشا	Optimal operating parameters TMP (bar)فشار	 FFR (m/s)دبی	 Temperature (°C)دما	Fouling resistance مقاومت گرفتگی	Fouling mechanism مکانیسم گرفتگی	Ref. منبع
Tubular لوله‌ای	Ceramic, 50 & 300 kDa	2	0.5	20	√	×	Vladisavljevic *et al.* (2003)
Tubular لوله‌ای	PVDF, 18 kDa	2.5	1	50	×	×	Yazdanshenas *et al.* (2005)
Tubular لوله‌ای	Ceramic, 15 & 50 kDa	1.5	7	55	×	√	Bruijn *et al.* (2006)
Plate & frame قاب و صفحه	PES, 50 kDa	1-3	2.5	50	×	×	He *et al.* (2007)
Flat plate صفحه‌ای	PES, 10 & 100 kDa	1-3	0.1	25	×	×	Onsekizoglu *et al.* (2010)
Plate & frame قاب و صفحه	PES 200 cm^2, UF 10 kDa	3	-	40	√	×	Bahçeci (2012)
Tubular ceramic UF-membrane غشا فراپالایش سرامیکی لوله‌ای	100 (1-channel) –300 (3-channels) Zirconium dioxide (ZrO_2)	3.5	13.5 L/h	50	×	×	Echavarría *et al.* (2012)
Tubular لوله‌ای	Polymeric, 0.3 μm	2	-	-	×	×	Aguiar *et al.* (2012)
Dead-end filtration فیلتراسیون انتها بسته	Polyamide, 0.2-0.45 μm, mix of cellulose acetate and cellulose nitrate, 0.45 μm	0.69-3.45	-	-	√	×	Fuenmayor *et al.* (2014)
Eectro-Ultrafiltration الکترو-فراپالایش							
Plasma modified membrane ultrafiltration فراپالایش با غشا بهبود یافته توسط پلاسما	PS, 228 cm^2, 30 kDa PS, 0.0140 cm^2, 100 kDa	2.76-6.9 2.5	0.6-1.0 -	55 -	√ √	× ×	Sarkar (2015) Gulec *et al.* (2018)
UF system سامانه فراپالایش	PES-10 kDa	7.5	10 L/h	25	×	×	Cai *et al.* (2020)
Scraped surface ultrafiltration فراپالایش با سامانه سطح تراش	PES-4 kDa	0.5	10 ml/s	25	√	√	Current study مطالعه حال حاضر



شکل ۱- نقشه انفجاری قسمت‌های مختلف ماژول طراحی شده، ۱) رتور، ۲) در پوش، ۳) محور، ٤) پوسته بالایی ماژول، ٥) پوسته پایینی سوراخ‌دار ماژول، ٦) تیغه، ۷) غشا، ۸) درگاه (سرشلنگی)، ۹) آب‌بند (کاسه نمد)، ۱۰) أرینگ، ۱۱) آب‌بند طولی، ۱۲) پیچ، ۱۳) قاب تحکیم کننده

Fig. 1- The exploded parts of designed module 1) Rotor, 2) Cap, 3) Shaft, 4) Upper part of module, 5) Lower meshed part of module, 6) Blade, 7) Membrane, 8) Port, 9) Packing, 10) O ring, 11) Longitudinal sealing, 12) Bolt, 13) Pressurized frame

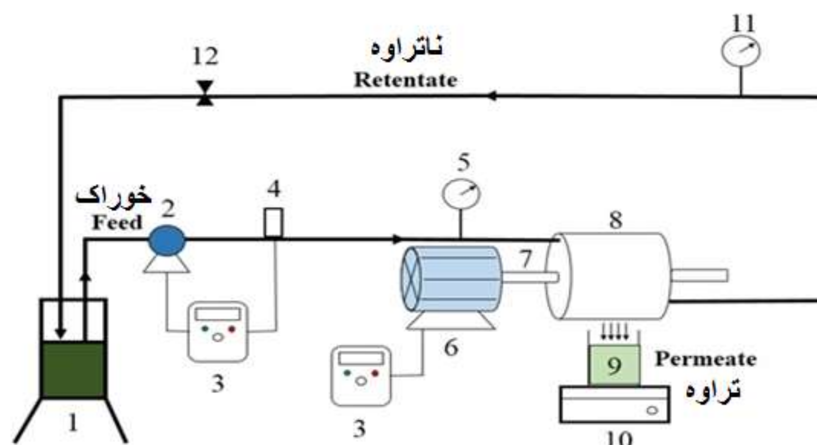
ماژول سطح تراش ساخته شده

ماژول غشایی سطح تراش با جنس پلی‌اتیلن طراحی و ساخته شد (شکل ۱). غشاء بین پوسته پایین و بالایی مدول محصور گردید. این دو قسمت با پیچ به هم متصل شده و قسمت استوانه‌ای را تشکیل دادند. بین این دو قسمت، آب‌بندی طولی قرار گرفت تا از نشت مایع از بین این دوقطعه جلوگیری گردد. برای بستن دو انتهای این استوانه و تشکیل محفظه بسته، دو درپوش و روی بدنه این درپوش‌ها أُرینگ برای جلوگیری از نشتی در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از حرکت طولی درپوش‌ها و آب‌بندی بهتر، دو قاب فلزی (یکی بالا و دیگری پائین محور) به صورت محوری این دو درپوش را توسط چهار پیچ به استوانه فشرده کرد تا هرگونه حرکت محوری درپوش‌ها و نشتی ناخواسته را از بین ببرد. محور روتور با یک جفت‌کننده[1] با الکتروموتور (Motogen, Tabriz, Iran) درگیر شد. سرعت دوران محور خروجی موتور توسط یک اینورتر (SV004ic5-1, Korea) تنظیم گردید. یک پمپ پره‌ای دوار (PROCON, Series 2, Milano, Italy)، آب میوه تازه را از طریق درگاه ورودی واقع بر روی درپوش به درون ماژول منتقل نمود. مقداری از آب میوه ورودی در اثر دوران روتور و فشار ناشی از اثر دورانی تیغه‌ها و پمپ، از غشا و سپس از پوسته سوراخ‌دار پایینی ماژول گذر نموده که تراوه فرایند را ایجاد می‌نمود. مابقی خوراک با توجه به ساختار، به عنوان ناتراوه از درگاه دیگر به مخزن آب میوه بازگردانده شد. تراوه برای بررسی بیشتر توزین و جمع‌آوری شد.

سامانه شفاف‌سازی غشایی

شماتیک کل اجزا سامانه در شکل ۲ نمایش داده شده است. غشا صفحه‌ای پلی‌اتر سولفون (PES) با اندازه منفذ ۴ کیلو دالتون با سطح فعال $۱/۱۲ \times ۱۰^{-۲}$ متر مربع در یک ماژول سطح تراش در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. در این سامانه، جریان خروجی از ماژول با یک شیر دستی تنظیم و با استفاده از فلومتر اندازه‌گیری شد و فشار با استفاده از یک اینورتر کوپل شده به ترانسمیتر تنظیم شد. یک پمپ پره‌ای دوار (PROCON, Series 2, Milano, Italy) برای انتقال آب میوه به ماژول غشایی استفاده شد و ناتراوه به مخزن تغذیه برگشت داده شد. یک ترازوی دیجیتال (A&D CO., LTD, EK-2000, Japan) با دقت ۰/۱ گرم برای اندازه‌گیری وزن تراوه استفاده شد. فشار خوراک و ناتراوه با استفاده از دو فشارسنج اندازه‌گیری شد.

1- Coupling



شکل ۲- شماتیکی از سامانه فراپالایش سطح تراش (۱- مخزن تغذیه ۲- پمپ ۳- اینورتور ٤- ترانسمیتر ٥- فشارسنج ورودی ٦- الکتروموتور ۷- جفت‌کننده ۸- ماژول سطح تراش ۹- مخزن تراوه ۱۰- ترازو ۱۱- فشارسنج خروجی ۱۲- شیر تنظیم دبی جریان)

Fig. 2- Shem of scraped-surface membrane ultrafiltration system: 1- Feed tank, 2- Pump, 3- Inverter, 4- Transmitter, 5-Input pressure gauge, 6- Electromotor, 7- Shaft, 8- Scraped surface module, 9- Permeate tank, 10- Balance, 11- Output pressure gauge, 12- Flow control valve

متغیرهای مورد بررسی در آزمون‌ها

متغیرهای انتخاب شده عبارتند از:

- فشار جریان در سه سطح (۰/۵، ۱ و ۱/۵ بار)
- دبی جریان در سه سطح (۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌لیتر بر ثانیه)
- سرعت دوران تیغه مرکزی در چهار سطح (۰، ۶۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ دور بر دقیقه). یک سرعت سنج نوری- مکانیکی (Lutron, DT-2236, Taiwan) برای تعیین سرعت روتور استفاده شد.
- فاصله نوک تیغه تا سطح غشاء در دو سطح (۲ و ۵ میلی‌متر)

تئوری

فاکتور غلظت حجمی (VCF)

VCF یک پارامتر عملیاتی بسیار مهم جهت کاربرد تکنولوژیکی صنعتی می‌باشد (Echavarría *et al.*, 2011) که بازده کلی فرآیند فراپالایش را در حین شفاف‌سازی آب میوه نشان می‌دهد. این فاکتور به‌صورت حجم اولیه آب میوه تقسیم بر حجم ناتراوه در زمان‌های مختلف تعریف شده و با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$VCF = 1 + \frac{V_p}{V_r} = \frac{V_f}{V_r} \qquad (۱)$$

در این رابطه V_f، V_P و V_r به‌ترتیب حجم اولیه تغذیه، تراوه و ناتراوه بر حسب m^3 می‌باشند (Echavarría *et al.*, 2011).

محاسبه مقاومت‌های مختلف غشا

مقاومت کل غشاء از مقاومت‌های مختلفی تشکیل شده که در رابطه زیر به آن‌ها اشاره شده است:

$$R_t = R_m + R_c + R_{firr} + R_{frev} \qquad (۲)$$

که در آن R_m مقاومت غشاء تازه، R_c مقاومت لایه کیک، R_{frev} مقاومت گرفتگی قابل برگشت و R_{firr} مقاومت گرفتگی غیر قابل برگشت است که همه مقاومت‌ها بر حسب m^{-1} محاسبه و گزارش شدند. برای محاسبه‌ی هرکدام از مقاومت‌ها، بعد از فرآیند به‌ترتیب مراحل شستشو با آب، شستشو با سود ۰/۵ درصد و شستشو با اسید استیک ۰/۱ درصد همگی در کمترین فشار و بیشترین دبی به مدت نیم ساعت انجام شده و مقدار مقاومت‌ها به شیوه‌ی زیر محاسبه شد.

مقاومت داخلی غشاء (R_m) مقاومتی است که توسط خود غشاء در برابر عبور ترکیبات اعمال می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_m = \frac{1}{\mu_w L_p^0} \qquad (۳)$$

که در آن μ_w ویسکوزیته آب (Pa.s) و L_p^0 نفوذپذیری هیدرولیک غشاء تازه ($m\ Pa^{-1}\ s^{-1}$) است که از معادله ۴ بدست می‌آید.

$$L_p^0 = \frac{J_w}{\Delta P} \qquad (۴)$$

که در آن J_w شار آب در غشاء تازه ($m\ s^{-1}$) و ΔP فشار انتقال غشائی بر حسب Pa می‌باشد.

مقدار مقاومت کل (R_t) از رابطه زیر بدست آمد:

$$R_t = \frac{1}{\mu_w \times L_P^1} \qquad (۵)$$

که در آن L_p^1 نفوذپذیری هیدرولیک غشاء بعد از فرآیند با آب سیب است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$L_p^1 = \frac{J_W^1}{\Delta P} \quad (۶)$$

که در آن J_W^1 شار آب بعد از فرآیند با آب سیب می‌باشد.

مقدار مقاومت گرفتگی غیر قابل برگشت (R_{firr}) از رابطه زیر بدست آمد:

$$R_m + R_{firr} = \frac{1}{\mu_w L_P^4} \quad (۷)$$

$$L_P^4 = \frac{J_W^4}{\Delta P} \quad (۸)$$

که در آن L_P^4 نفوذپذیری هیدرولیک اندازه‌گیری شده بعد از شستشو با اسید است که در آن J_W^4 شار آب بعد از شستشو با اسید می‌باشد.

مقدار مقاومت گرفتگی قابل برگشت (R_{frev}) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_m + R_{frev} + R_{firr} = \frac{1}{\mu_w L_P^2} \quad (۹)$$

که در آن L_p^2 نفوذ پذیری هیدرولیک اندازه‌گیری شده بعد از شستشو با آب است.

تنها مقاومت باقیمانده مقاومت کیک است که از کم نمودن مجموع مقاومت‌های داخلی غشاء، گرفتگی قابل برگشت و گرفتگی غیرقابل برگشت از مقاومت کل بدست می‌آید (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010).

$$R_c = R_t - R_{frev} - R_{firr} - R_m \quad (۱۰)$$

مکانیسم‌های گرفتگی

چهار مکانیسم اصلی برای گرفتگی غشا وجود دارد که شامل بلوکه شدن کامل، بلوکه شدن میانی، تشکیل کیک و بلوکه شدن استاندارد می‌باشند.

هرمیا (Hermia, 1982) قانونی را ایجاد نمود که با استفاده از آن می‌توان تشخیص داد که کدامیک از مکانیسم‌های بالا غالب است. بر طبق این قانون از ساختار منحنی تغییرات حجم تراوه (v) نسبت به زمان (t) می‌توان به مکانیسم گرفتگی غالب در فرآیند پی برد. بدین‌صورت که:

الف) در صورتی که منحنی t/v نسبت به v خطی باشد مکانیسم تشکیل کیک مکانیسم غالب است.

ب) در صورتی که منحنی t/v نسبت به t خطی باشد مکانیسم بلوکه شدن استاندارد غالب است.

ج) زمانی که بلوکه شدن میانی مکانیسم غالب است منحنی $Ln(t)$ نسبت به v خطی خواهد بود.

سه قانون بالا مکانیسم گرفتگی غالب را در کل فرآوری نشان می‌دهد اما در هر فرآیند تمامی مکانیسم‌ها می‌توانند تأثیرگذار باشند و بسته به شرایط در هر زمان یک مکانیسم، مکانیسم غالب است (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010; Sarlaki *et al.*, 2020). برای اینکه بدانیم در هر زمان کدام مکانیسم غالب است هرمیا رابطه‌ای را به شکل زیر ارائه نموده است:

$$\frac{d^2t}{dv^2} = k\left(\frac{dt}{dv}\right)^i \quad (۱۱)$$

در رابطه بالا t زمان، k ضریب گرفتگی، i اندیس بلوکه شدن و v حجم تراوه است. مقدار i نشان‌دهنده مکانیسم بلوکه شدن است. بدین‌صورت که:

الف) اگر i=0 باشد، مکانیسم غالب تشکیل کیک است.

ب) اگر i=1 باشد، مکانیسم غالب بلوکه شدن میانی است.

ج) در صورتی‌که i = 1.5 باشد، بلوکه شدن استاندارد مکانیسم غالب است.

د) زمانی‌که i=2 باشد، مکانیسم غالب بلوکه شدن کامل است (Hermia, 1982).

مطالعه ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

مطالعه ریز ساختاری غشا به‌منظور بررسی لایه گرفتگی روی غشا و در عرض آن انجام شد. عکسهایی از سطح یا برش عرضی غشاء قبل و بعد از فرآیند توسط میکروسکوپ الکترونی نوع SEM (مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند) تهیه شد. روش نشاندن طلا ترسیب بخار فیزیکی بود. نام دستگاه لایه نشانی طلای مورد استفاده روکش دهنده سریع (بال تکنولوژی، مدل SCDOOS، سوئیس) بود.

آزمون آماری

تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد و مقادیر میانگین گزارش شده است. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) انجام شد. نرم‌افزار Minitab 15 برای مقایسه داده‌ها با استفاده از آزمون‌های چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

آنالیز فاکتور غلظت حجمی (VCF)

اثرات پارامترهای عملیاتی فشار (TMP)، سرعت جریان (FFR)، سرعت چرخش تیغه‌ها و فاصله تیغه از سطح غشا بر فاکتور غلظت حجمی (VCF) طی فرآیند شفافسازی آب سیب به کمک ماژول سطح تراش در شکل ۳ نشان داده شده‌است. نتایج نشان داد که میزان VCF با افزایش سرعت چرخش تیغه تا ۲۲۰۰ دور در دقیقه، تا مقدار ۱/۶۳ افزایش یافت (شکل ۳– الف) که ناشی از تلاطم بالاتر جریان در داخل ماژول است که منجر به قطبش غلظتی پایین‌تر و در نتیجه

گرفتگی غشایی کمتر در سرعت چرخش بالاتر می‌شود. مطالعات نشان داده است که شار تراوه در شفاف‌سازی آب میوه‌ها توسط سامانه UF تحت تأثیر VCF قرار می‌گیرد. VCFهای بالا را می‌توان در آب میوه‌هایی با پالپ کمتر مانند آب سیب و آب انگور به‌راحتی بدست آورد. برای آب میوه‌هایی با پالپ بالا، مانند میوه‌های استوایی مقادیر VCF پایین‌تر است. بازده آب میوه بازیابی شده $(1-\frac{1}{VCF})$ یک پارامتر اقتصادی در صنایع است (Cassano *et al*., 2018). مطالعه اخیر نشان داد که طراحی و ساخت ماژول‌های سطح تراش می‌تواند در افزایش VCF کمک شایانی بنماید.

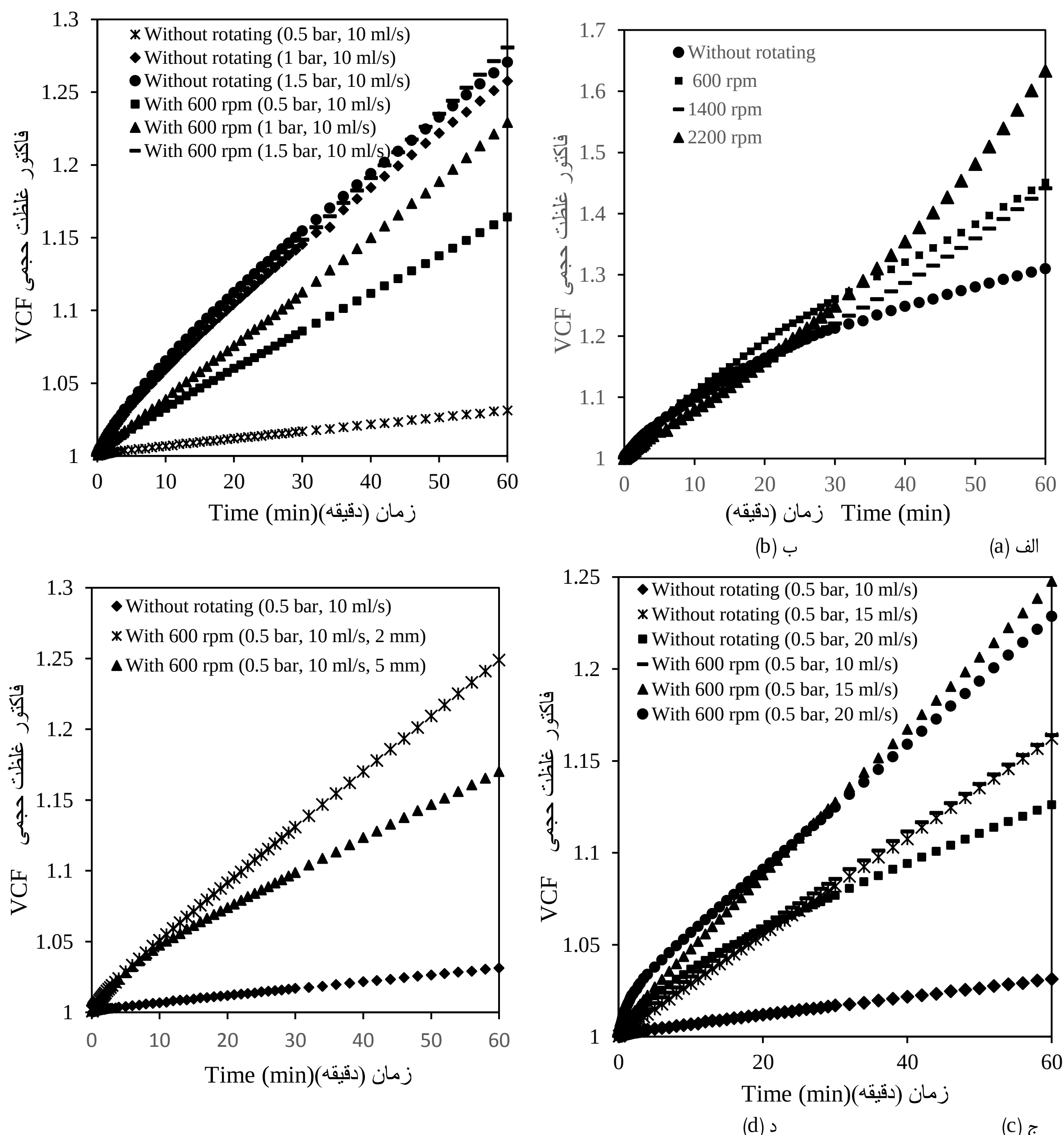
بررسی اثر فشار (TMP) بر میزان اثر بخشی چرخش تیغه در سامانه سطح تراش بر راندمان فرایند نشان داد که در TMP پایین (۰/۵ بار) با سرعت چرخش ۶۰۰ دور در دقیقه تیغه‌ها، VCF بطور قابل توجهی بالاتر از حالت بدون چرخش در شرایط یکسان است. این تفاوت در فشارهای بالاتر مشاهده نشد (شکل ۳-ب). همچنین مطالعه اثر دبی جریان بر میزان اثر بخشی سامانه نشان داد که چرخش تیغه‌ها در سامانه طراحی شده در مواقعی که دبی جریان پایین باشد بیشتر است (شکل ۳-ج). دلیل این نتیجه را می‌توان در افزایش تلاطم جریان به واسطه دبی‌های بالای حجمی دانست که می‌تواند اثربخشی چرخش تیغه‌ها در سامانه طراحی شده را کاهش دهد. با بررسی اثر فاصله لبه تیغه با سطح غشا مشاهده شد که کاهش این فاصله می‌تواند اثر بخشی آن در افزایش VCF را بهبود بخشد. به عبارت دیگر در سامانه‌هایی که فاصله لبه تیغه با سطح غشا کمتر است اثر بخشی چرخش تیغه بر راندمان سامانه بیشتر می‌شود. دلیل این مشاهده را می‌توان تمرکز تلاطم جریان ایجاد شده توسط تیغه در حجم کنترل محدودتر و البته نزدیکتر به لایه مرزی سطح غشا دانست (شکل ۳-د).

لو و همکاران (Lou *et al*., 2013) دریافتند در سرعت چرخشی ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه طی فرآیند UF آب کاسنی به کمک RDM، میزان VCF با اندازه منافذ افزایش یافت. در حالی‌که در شرایط ۵۰۰ دور در دقیقه تقریبا مستقل از غشا بود. آنها اظهار داشتند این پدیده را می‌توان با مکانیسم‌های گرفتگی در نرخ‌های برشی مختلف توضیح داد. بر این اساس در سرعت چرخش بالا، از آنجایی که لایه کیک ناچیز است شار تراوه تحت تأثیر نفوذپذیری غشا هست (اندازه منافذ، آب دوستی) در حالی‌که در سرعت چرخش پایین رسوبات مانند پکتین، پروتئین و مواد جامد معلق به‌راحتی بر روی غشا رسوب می‌کنند و در نتیجه یک لایه ضخیم و فشرده کیک ایجاد شده و شار تراوه عمدتا توسط لایه کیک کنترل می‌شود و مستقل از نفوذپذیری غشا است. بنابر این نرخ‌های برشی بالاتر می‌تواند تجمع املاح در سطح غشا را کاهش دهد و در نتیجه مقاومت کل را کاهش دهد که منجر به این می‌شود که شار تراوه در TMP ثابت متناسب با سرعت چرخش شود. با این حال نرخ برش بیش از حد، هدر رفت انرژی و سایش تجهیزات را به همراه دارد.

طبق بررسی کسانو و همکاران (Cassano *et al*., 2018) یک رابطه خطی بین VCF و ترکیبات فعال زیستی بازیافتی در آب میوه شفاف شده وجود دارد. همچنین اچاواریا و همکاران (Echavarría *et al*., 2012) بالاترین VCF را به میزان ۱/۵۸ برای فرآیند فراپالایش و اسمز معکوس آب سیب گزارش دادند که از VCF حاصل در تحقیق حاضر در دور بالای تیغه کمتر بود. در مطالعه‌ای دیگر باتاچارجی و همکاران (Bhattacharjee *et al*., 2017b) بر روی آب هندوانه نشان دادند که پس از رسیدن VCF نهایی به ۲، شار تراوه اولیه از $L.m^{-2}h^{-1}$ ۱۸ به $L.m^{-2}h^{-1}$ ۷/۵ (٪۴۲) کاهش یافت. در این مطالعه بالاترین میزان VCF ۱/۶۳ تحت TMP ۰/۵ بار و سرعت دوران تیغه‌ها ۲۲۰۰ دور در دقیقه با زمان فرآیند ۱ ساعت به‌دست آمد. مقدار بیشتر VCF در این مطالعه در مقایسه با سایر مطالعات بر روی آب سیب نشان دهنده‌ی پلاریزاسیون غلظتی کمتر و گرفتگی کمتر در فرآیند بوده که عملکرد خوب واحد غشایی سطح تراش را در شفاف‌سازی آب سیب ثابت می‌کند.

آنالیز مقاومت‌های گرفتگی

بررسی مقاومت‌های مختلف نشان داد که تمامی مقاومت‌ها در فرآیند UF با چرخش تیغه در مقایسه با شرایط بدون چرخش پایین‌تر بوده است (شکل ۴). مطالعه اثربخشی فشار بر تغییرات مقاومت‌ها نشان داد که در شرایط بدون چرخش تیغه با FFR ثابت $ml\ s^{-1}$ ۱۰ مقاومت کل، مقاومت برگشت‌پذیر و مقاومت غیرقابل برگشت با افزایش TMP از ۰/۵ بار به ۱ بار، کاهش یافت. اما با افزایش TMP از ۱ بار به ۱/۵ بار، تمامی مقاومت‌های ذکر شده به همراه مقاومت کیک افزایش یافت. اما با اعمال چرخش تیغه به میزان ۶۰۰ دور در دقیقه در TMP ۰/۵ بار، مقاومت کل به اندازه ٪۷۱/۷۸ کاهش یافت.



شکل ۳- تأثیر پارامترهای مختلف بر فاکتور غلظت حجمی (VCF) در طی فرآیند فراپالایش آب سیب به کمک سامانه سطح تراش: الف) سرعت چرخش تیغه‌ها، ب) فشار، ج) سرعت جریان، د) فاصله تیغه‌ها از سطح غشا

Fig. 3- Effect of different parameters on volumetric concentration factor (VCF) during UF-processing of apple juice with scraped-surface system; a: blade speed, b: TMP, c: FFR and d: blade distance from membrane surface

همچنین مقاومت برگشت‌پذیر، مقاومت غیرقابل برگشت و همچنین مقاومت کیک به‌ترتیب ۸۱/۴۸، ۸۶/۳ و ۳۴/۸۷ درصد کاهش نشان دادند. لازم به ذکر است مقاومت کل، مقاومت کیک و مقاومت غیرقابل برگشت در TMP ۱/۵ بار به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از TMP ۰/۵ بار در حالت چرخش تیغه ۶۰۰ دور در دقیقه بود. دلیل این پدیده این است که با افزایش TMP نیروی محرکه بیشتر شده و در نتیجه ذرات بیشتری به سمت سطح غشا حرکت می‌کنند که باعث کاهش اثر بخشی تلاطم حاصل از چرخش تیغه و در نتیجه افزایش مقاومت‌های فوق می‌شود. این نتایج مطابق با نتایج نوربخش و همکاران (Nourbakhsh *et al.*, 2014)، حجت‌پناه و همکاران (Hojjatpanah *et al.*, 2011)، میرسعیدقاضی و همکاران (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010) بود.

نوربخش و همکاران (Nourbakhsh *et al.*, 2014) اثرات TMP را بر مقاومت گرفتگی طی میکروفیلتراسیون آلوی قرمز و هندوانه ارزیابی کردند و متوجه شدند که مقاومت‌های کیک، برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر با افزایش TMP بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. در مطالعه‌ای دیگر، کاسانو و همکاران (Cassano *et al.*, 2007) مشاهده کردند که سهم مقاومت برگشت‌پذیر در مقایسه با مقاومت غیرقابل برگشت در فراپالایش آب کیوی بسیار مهم‌تر بوده است.

گولک و همکاران (Gulec *et al.*, 2018) گزارش کردند که میزان مقاومت برگشت‌پذیر در شفاف‌سازی غشایی آب سیب توسط UF زیاد است. آنها بیان کردند که ۸۶٪ از مقاومت کل به مقاومت برگشت‌پذیر مربوط بوده در حالی‌که ۶٪ از مقاومت کل به مقاومت غیرقابل برگشت مربوط است که نشان دهنده میزان جذب کمتر رسوب‌ها در داخل منافذ غشا است.

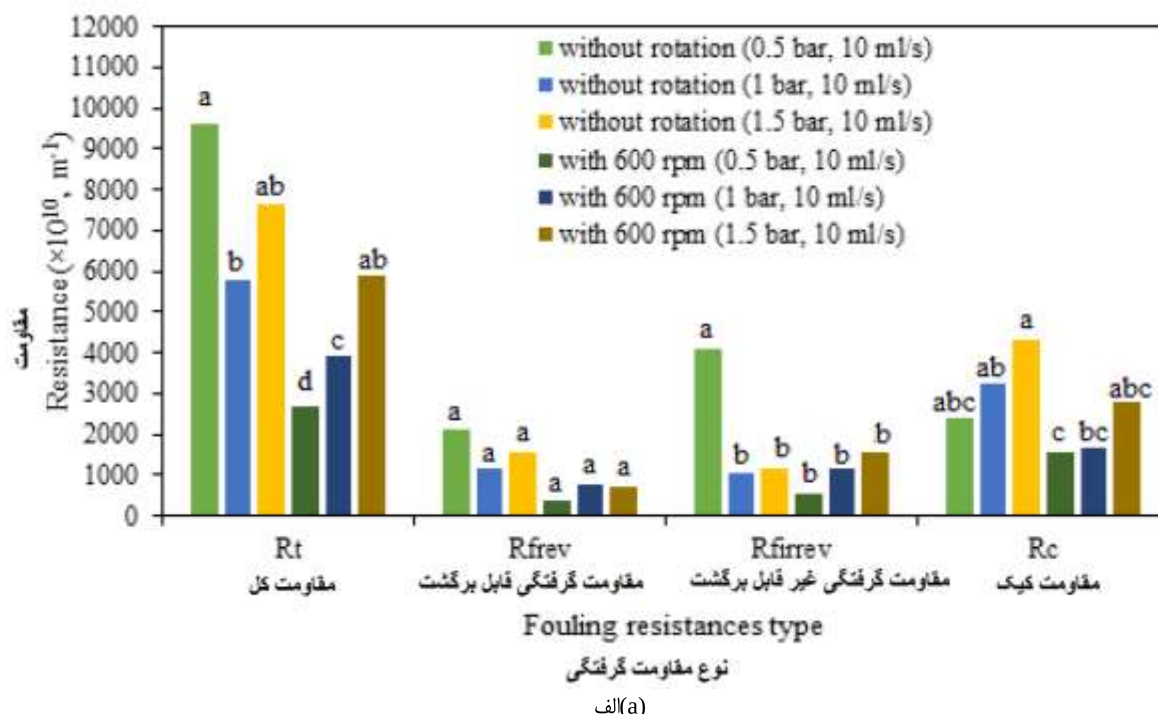
در مطالعه حاضر نتایج نشان داد که بیشترین کاهش در مقاومت کل در سرعت چرخش تیغه‌ها ۲۲۰۰ دور در دقیقه به میزان ۷۰/۹۶٪ و کمترین میزان کاهش در مقاومت کل در سرعت چرخش تیغه‌ها ۱۴۰۰ دور در دقیقه به میزان ۶۶/۶۶٪ دیده شد. همچنین بیشترین کاهش در مقاومت برگشت‌پذیر در سرعت چرخش تیغه‌ها ۲۲۰۰ دور در دقیقه به میزان ۹۸/۸٪ و کمترین کاهش در مقاومت برگشت‌پذیر در سرعت چرخش تیغه‌ها ۶۰۰ دور در دقیقه به میزان ۴۶٪ بود. بیشترین کاهش در مقاومت برگشت‌ناپذیر در سرعت چرخش تیغه‌ها ۶۰۰ دور در دقیقه به میزان ۸۱/۶۹٪ و کمترین میزان کاهش گرفتگی برگشت‌ناپذیر در سرعت چرخش تیغه‌ها ۲۲۰۰ دور در دقیقه به میزان ۶۶/۴۷٪ بود. بیشترین کاهش در مقاومت کیک در سرعت چرخش تیغه‌ها ۶۰۰ دور در دقیقه به میزان ۶۵/۸۶٪ و کمترین کاهش در مقاومت کیک در سرعت چرخش تیغه‌ها ۱۴۰۰ دور در دقیقه به میزان ۳۸/۶۶٪ بود (شکل ۴-ج). بطور خلاصه مقاومت کل با اعمال چرخش تیغه کاهش یافت. دلیل این امر می‌تواند پایداری بخشی از مقاومت برگشت‌پذیر در داخل دیوار منافذ و روی سطح غشا به دلیل نیروی اعمال شده توسط چرخش تیغه بر روی سطح غشا باشد. یافته‌های مطالعه حاضر نیز توسط گولک و همکاران (Gulec *et al.*, 2018)، کاسانو و همکاران (Cassano *et al.*, 2018)، میرسعیدقاضی و همکاران (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010)، صالحی‌نیا و همکاران (Salehinia *et al.*, 2021) در شفاف سازی غشایی آب سیب، پرتقال خونی و انار تأیید شد.

اثر سرعت جریان بر میزان اثربخشی چرخش تیغه‌ها، در سه سرعت جریان ($10\ ml\ s^{-1}$، $15\ ml\ s^{-1}$، $20\ ml\ s^{-1}$ و فشار ۰/۵ بار) در دو حالت بدون چرخش تیغه و اعمال چرخش تیغه به میزان ۶۰۰ دور در دقیقه بررسی شد. مطالعه اثر سرعت جریان بر میزان اثر بخشی سامانه نشان داد که اثر چرخش تیغه‌ها در سامانه طراحی شده در مواقعی که سرعت جریان پایین باشد بیشتر است. نتایج نشان داد که، با کاهش سرعت جریان، کارایی چرخش تیغه در کاهش مقاومت کل، مقاومت کیک، مقاومت برگشت‌پذیر و مقاومت برگشت‌ناپذیر افزایش می‌یابد. بنابر این بهترین عملکرد اثربخشی چرخش تیغه در سرعت جریان $10\ ml\ s^{-1}$ به دست آمد. دلیل این نتیجه را می‌توان در افزایش تلاطم جریان به واسطه سرعت جریان‌های بالا دانست که می‌تواند اثربخشی چرخش تیغه در سامانه طراحی شده را کاهش دهد (شکل ۴-ب).

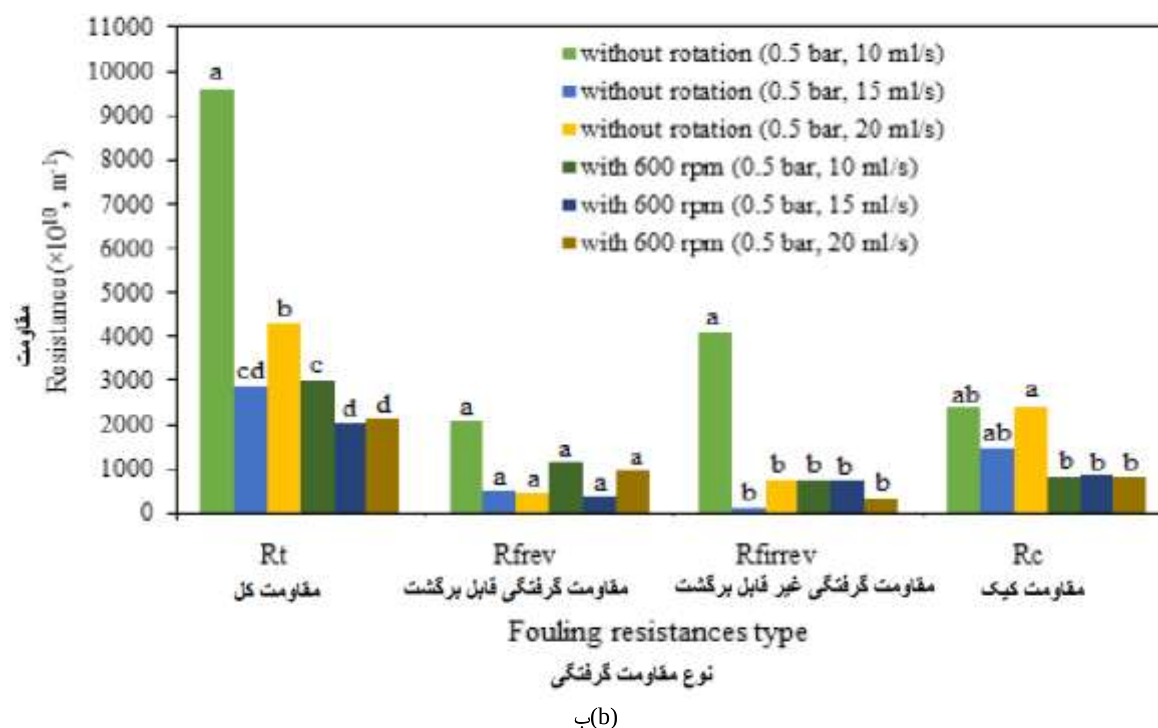
اثر FFR بر مقاومت کل نشان داد که در TMP ثابت (۰/۵ بار) در هر دو حالت با چرخش و بدون چرخش تیغه، ابتدا مقاومت کل با افزایش FFR تا $15\ ml\ s^{-1}$ کاهش یافت، در حالی‌که با افزایش FFR از $15\ ml\ s^{-1}$ به $20\ ml\ s^{-1}$ مقاومت کل افزایش یافت (شکل ۴-ب). این ممکن است به این دلیل باشد که نیروهای مماسی قابل توجهی ذرات رسوب شده بر روی سطح غشا را جارو می‌کنند. این مطلب را میرسعیدقاضی و همکاران (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010) و صالحی‌نیا و همکاران (Salehinia *et al.*, 2021) در شفاف‌سازی غشایی آب انار گزارش کردند.

بررسی اثر سرعت چرخش تیغه در سامانه طراحی شده بر مقاومت‌های مختلف نشان داد که چرخش تیغه‌ها باعث کاهش مقاومت کل و اکثر مقاومت‌ها شده است اما افزایش سرعت چرخش تیغه تفاوت معنی‌داری در مقاومت کل نشان نداد (شکل ۴-ج). قاعدتا رفتار مشابهی بر هر کدام از مقاومت‌ها حاکم بود. دلیل این امر این بود که در پایین‌ترین سرعت دوران تیغه‌ها کفایت اثر بخشی چرخش آن‌ها بر کاهش پلاریزاسیون غلظتی حاصل شد. لو و همکاران (Lou *et al.*, 2013) گزارش کردند که افزایش سرعت چرخش دیسک در فرآیند RDM به کمک UF برای شفاف‌سازی آب کاسنی، منجر به افزایش شار تراوه شده و پلاریزاسیون و گرفتگی را کنترل کرد. آنها دریافتند که سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور در دقیقه از نظر انرژی به صرفه بوده و برای کنترل رسوب لازم است ولی افزایش سرعت چرخش به ۲۰۰۰ دور در دقیقه باعث حذف لایه گرفتگی می‌شود.

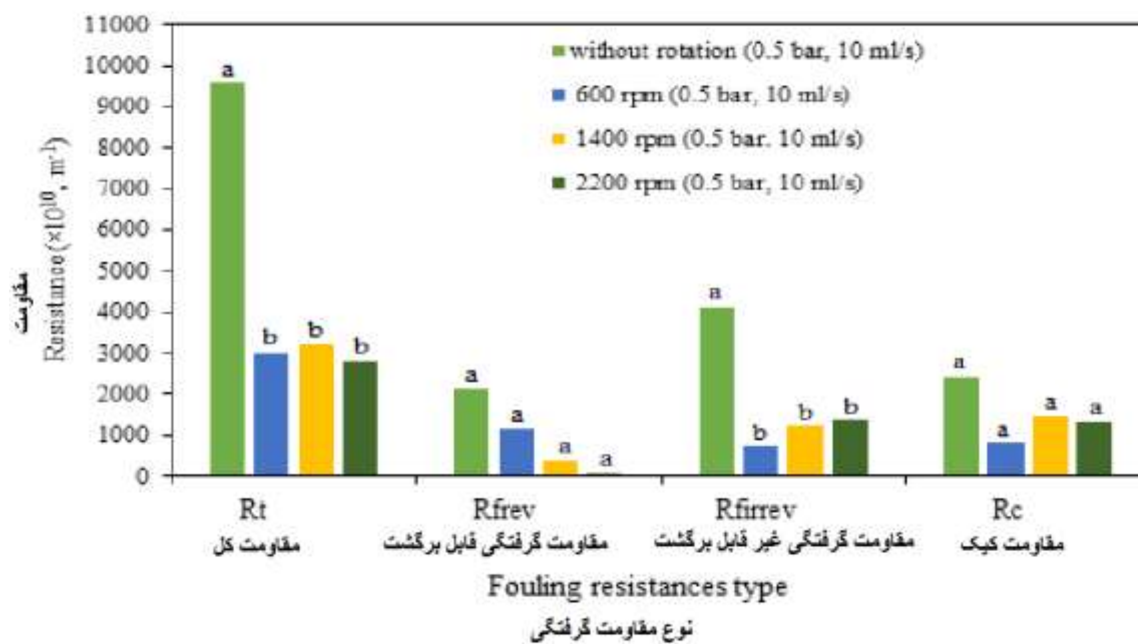
مطالعه اثر فاصله لبه تیغه تا سطح غشا نشان داد که با افزایش این فاصله مقاومت کیک دچار افزایش شد اما سایر مقاومت‌ها تغییر معنی‌داری را نشان ندادند. دلیل این امر تمرکز تنش حاصل از چرخش تیغه در حجم کنترل کوچکتری در فرایند با تیغه نزدیک‌تر به سطح غشا بود (شکل ۴- د).


without rotation (0.5 bar, 10 ml/s)
without rotation (1 bar, 10 ml/s)
without rotation (1.5 bar, 10 ml/s)
with 600 rpm (0.5 bar, 10 ml/s)
with 600 rpm (1 bar, 10 ml/s)
with 600 rpm (1.5 bar, 10 ml/s)
مقاومت
Resistance (×10^10, m^-1)
Rt
مقاومت کل
Rfrev
مقاومت گرفتگی قابل برگشت
Rfirrev
مقاومت گرفتگی غیر قابل برگشت
Rc
مقاومت کیک
Fouling resistances type
نوع مقاومت گرفتگی

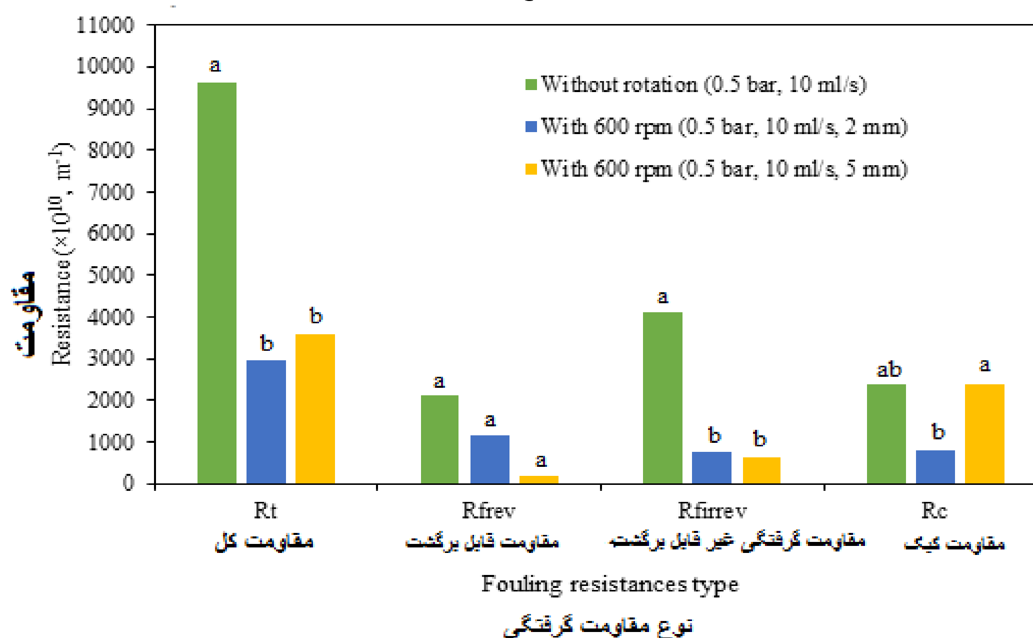
(a)الف


without rotation (0.5 bar, 10 ml/s)
without rotation (0.5 bar, 15 ml/s)
without rotation (0.5 bar, 20 ml/s)
with 600 rpm (0.5 bar, 10 ml/s)
with 600 rpm (0.5 bar, 15 ml/s)
with 600 rpm (0.5 bar, 20 ml/s)
مقاومت
Resistance (×10^10, m^-1)
Rt
مقاومت کل
Rfrev
مقاومت گرفتگی قابل برگشت
Rfirrev
مقاومت گرفتگی غیر قابل برگشت
Rc
مقاومت کیک
Fouling resistances type
نوع مقاومت گرفتگی

(b)ب



ج(c)



د(d)

شکل ٤- اثرات الف) فشار، ب) سرعت جریان، ج) سرعت چرخش تیغه، د) فاصله تیغه از سطح غشا بر مقاومت‌های گرفتگی مختلف در شفاف‌سازی غشایی آب سیب با استفاده از سامانه سطح تراش

Fig. 4- Effects of a: TMP, b: FFR, c: blade speed and d: blade distance from membrane surface on different fouling resistances during membrane clarification of apple juice with scraped surface unit

مکانیسم‌های غالب گرفتگی

به منظور برررسی مکانیسم‌های غالب گرفتگی در کل فرایند رابطه بین حجم تراوه (v) و زمان شفاف‌سازی (t) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در اکثر موارد منحنی t/v به v، خطی‌تر از منحنی t/v به t و Ln(t) به v می‌باشد (جدول ۲). از این رو مکانیسم اصلی گرفتگی در فراپالایش آب سیب تشکیل لایه کیک می‌باشد. همچنین استفاده از تیغه چرخان با سرعت چرخش ۶۰۰ دور در دقیقه، مکانیسم غالب گرفتگی طی شفاف‌سازی غشایی آب سیب را تغییر چندانی نداد.

البته قابل ذکر است مقادیر R^2 مرتبط با همبستگی منحنی رسم شده با یک منحنی خطی در حالت چرخش تیغه‌ها با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه نسبت به حالت بدون چرخش تیغه کاهش یافت که این امر نشان دهنده کاهش شدت مکانیسم تشکیل کیک در گرفتگی است. مطالعه نشان داد در سرعت چرخش تیغه بالاتر (۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ دور در دقیقه) مکانیسم غالب گرفتگی از نوع استاندارد بود که نشان می‌دهد سرعت زیاد چرخش تیغه منجر به تلاطم بالای جریان و ممانعت از تشکیل کیک روی غشاء و نفوذ ذرات ریز به داخل غشاء شده است.

جدول ۲- رابطه بین حجم تراوه و زمان فرآیند برای تعیین مکانیسم غالب گرفتگی در فرآیندهای فراپالایش آب سیب بااستفاده از سامانه سطح تراش

Table 2- Relation between permeate volume (v) and process time (t) to determine the dominant fouling mechanisms in scraped-surface membrane unit during UF processing of apple juice

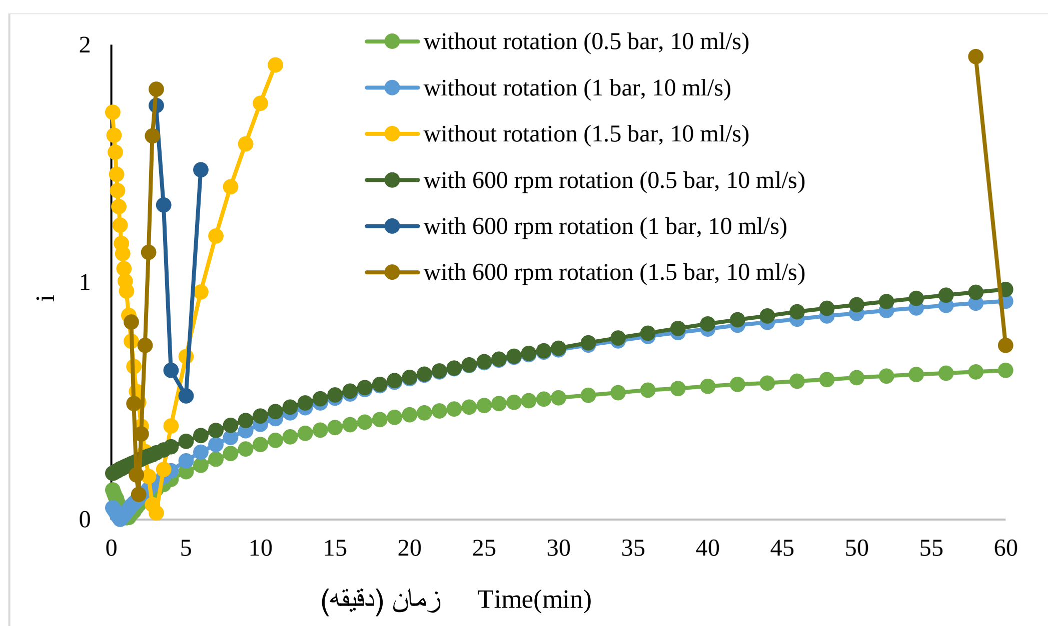
Blade distance (mm) فاصله تیغه ها	TMP (bar) فشار	FFR (ml/s) سرعت جریان	Blade speed (rpm) میزان دور تیغه	R^2 to fit each chart with linear line ضریب همبستگی: t/v vs. v (cake formation)	t/v vs. t (standard pore blocking)	Ln(t) vs. v (intermediate pore blocking)	Type of fouling mechanism نوع مکانیسم گرفتگی
2	0.5	10	No rotation بدون چرخش	**0.929267**	0.816267	0.876467	Cake formation تشکیل کیک
		15		**0.8339**	0.7527	0.8043	
		20		**0.9966**	0.8448	0.9489	
	1	10		**0.9816**	0.8184	0.929	
	1.5			**0.9862**	0.8287	0.9316	
	0.5		600	**0.83005**	0.7686	0.7865	Cake formation تشکیل کیک
		15		**0.8862**	0.7792	0.834	
		20		**0.9198**	0.814	0.8498	
	1	10		**0.7795**	0.7539	0.7436	
	1.5			**0.946**	0.8063	0.8832	
	0.5		1400	0.3351	**0.7107**	0.3399	Standard pore blocking استاندارد
			2200	0.6983	**0.7392**	0.6814	
5	0.5	10	600	**0.9817**	0.8362	0.919	Cake formation تشکیل کیک

در نتیجه مکانسیم غالب گرفتگی در اکثر شرایط براساس مدل هرمیا تشکیل لایه کیک بود که مشابه نتایج بدست آمده توسط ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2013) برای فراپالایش آب کاسنی به کمک RMD، وارما و سرکار (Verma and Sarkar, 2015) برای فراپالایش آب سیب، نوربخش و همکاران (Nourbakhsh *et al.*, 2014) برای شفاف‌سازی آب آلو قرمز، داولیویرا و همکاران (de Oliveira *et al.*, 2012) برای ریزپالایش آبمیوه پشن فروت، نادی و همکاران (Nadi *et al.*, 2012) در فیلتراسیون آب پرتقال سانتریفوژ شده و تحت تیمارآنزیمی قرار گرفته، رای و همکاران (Rai *et al.*, 2007) در فراپالایش با جریان عرضی آب موسامبی پکتین‌زدایی شده، دباروس و همکاران (De Barros *et al.*, 2003) طی فراپالایش آب آناناس پیش تیمار شده با آنزیم توسط غشاء فیبر توخالی PS، میرسعیدقاضی و همکاران (Mirsaeedghazi *et al.*, 2010) برای فراپالایش آب انار و علی‌اصغری اقدم و همکاران (Aliasghari Aghdam *et al.*, 2015) طی شفاف‌سازی غشایی آب انار به کمک فراصوت بود.

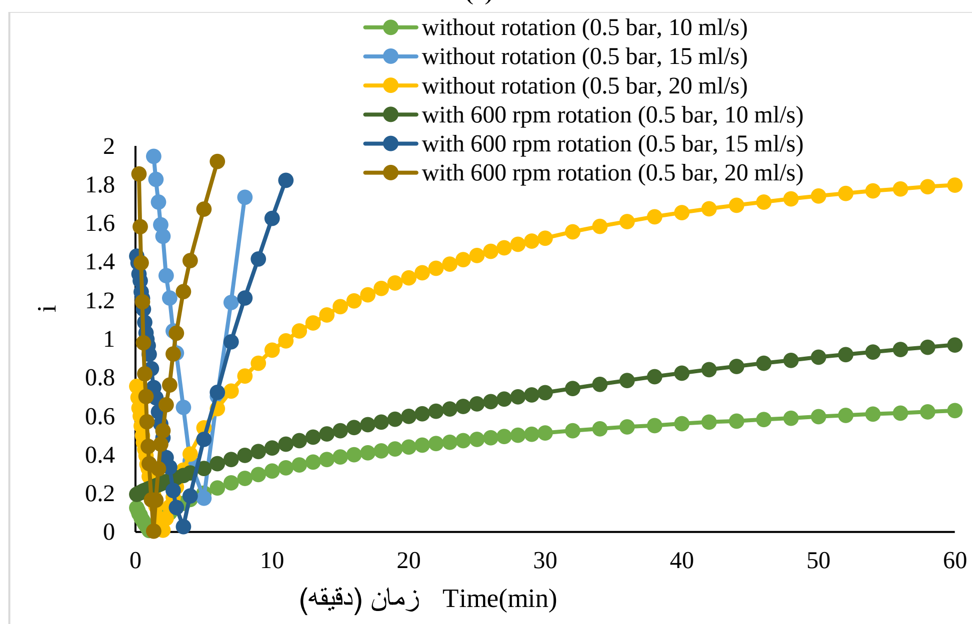
مطالعه اندیس بلوکه شدن

از آنجایی که کاهش سریع شار تراوه در طول فراپالایش توانایی کارخانه را در سطح تجاری در شفاف‌سازی آب میوه‌ها محدود می‌کند (Onsekizoglu, 2010)، باید تلاشی برای درک و مدل‌سازی مکانیسم کاهش شار انجام شود و بهبود عملکرد فرآیند باید به گونه‌ای باشد که بتوان آن را به لحاظ اقتصادی در خط تولید آب میوه پیاده‌سازی کرد. اندیس بلوکه شدن برای مطالعه نوع مکانیسم غالب گرفتگی در هر نقطه از فرآیند محاسبه شد. نتایج نشان داد که در فرایند بدون چرخش تیغه مکانیسم غالب بر فرایند در کل طول زمان آن مکانیسم تشکیل کیک است اما با شروع چرخش تیغه و بخصوص با افزایش سرعت چرخش آن در همان دقایق ابتدایی فرایند مکانیسم غالب گرفتگی از تشکیل کیک به سمت بلوکه شدن‌های میانی، استاندارد و کامل پیش می‌رود (شکل ۵ الف – د). این اتفاق می‌تواند به دلیل از بین بردن کیک روی غشاء توسط دوران تیغه و نفوذ ذرات آبمیوه به منافذ غشاء باشد. شرایط در فشارهای مختلف و فواصل متفاوت تیغه تا سطح غشاء تغییری نکرده و مکانیسم‌های گرفتگی رفتاری شبیه به آنچه در ابتدا

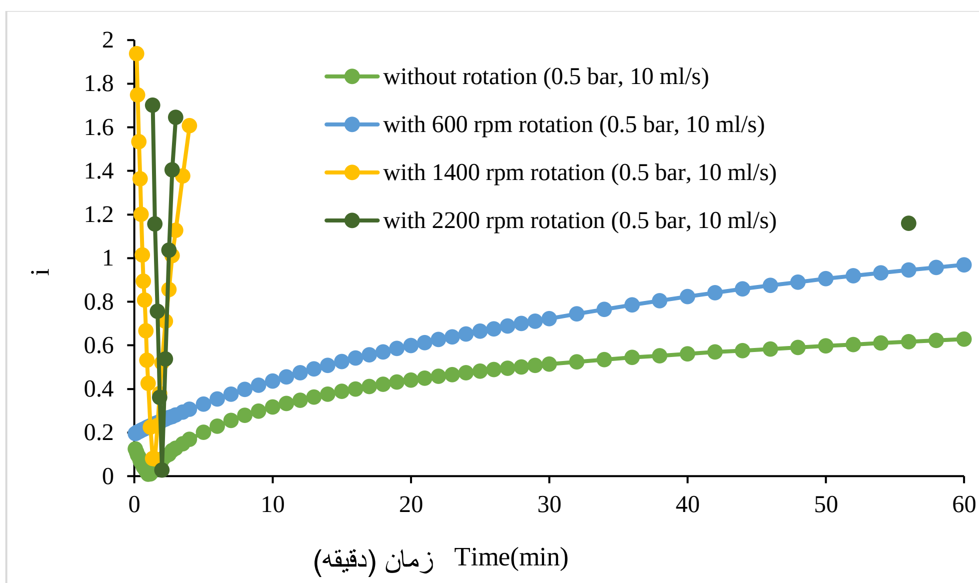
ذکر شد دارند. اما در سرعت جریان‌های بالا مکانیسم گرفتگی حتی در حالت بدون چرخش تیغه به سمت مکانیسم‌های بلوکه شدن میانی، استاندارد و کامل پیش می‌رود اما با این تفاوت که پیدایش بلوکه شدن کامل در حالت بدون چرخش تیغه و در سرعت جریان بالا در اواخر فرایند اتفاق می‌افتد اما در حالت با چرخش خیلی سریعتر و در دقایق اولیه فرایند بلوکه شدن کامل حادث خواهد شد (شکل ۵ -ب). دلیل این امر اثربخشی سرعت جریان بالا در تراشیدن سطح غشا و ممانعت از تشکیل لایه ضخیم کیک و به دنبال آن پیدایش سایر مکانیسم‌های گرفتگی است که البته شدت تلاطم حاصله به اندازه تلاطم حاصل از چرخش تیغه نبوده است در نتیجه رسیدن به زمان وقوع گرفتگی میانی، استاندارد و کامل با افزایش FFR کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش ضخامت لایه کیک با افزایش FFR است (Hemmati *et al.*, 2021 Conidi *et al.*, 2020; Aliasghari Aghdam *et al.*, 2015;).



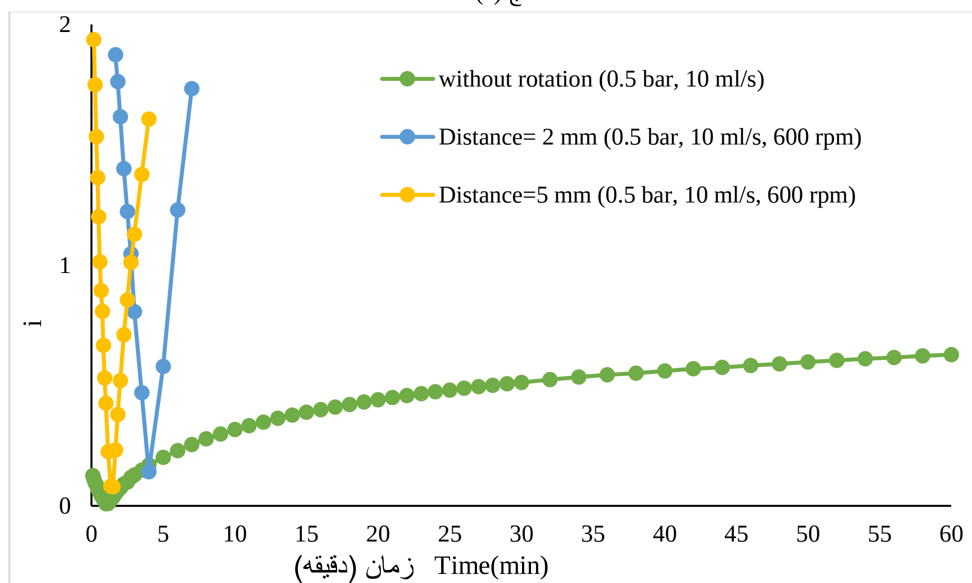
(a) الف



(b) ب



(c) ج



(d) د

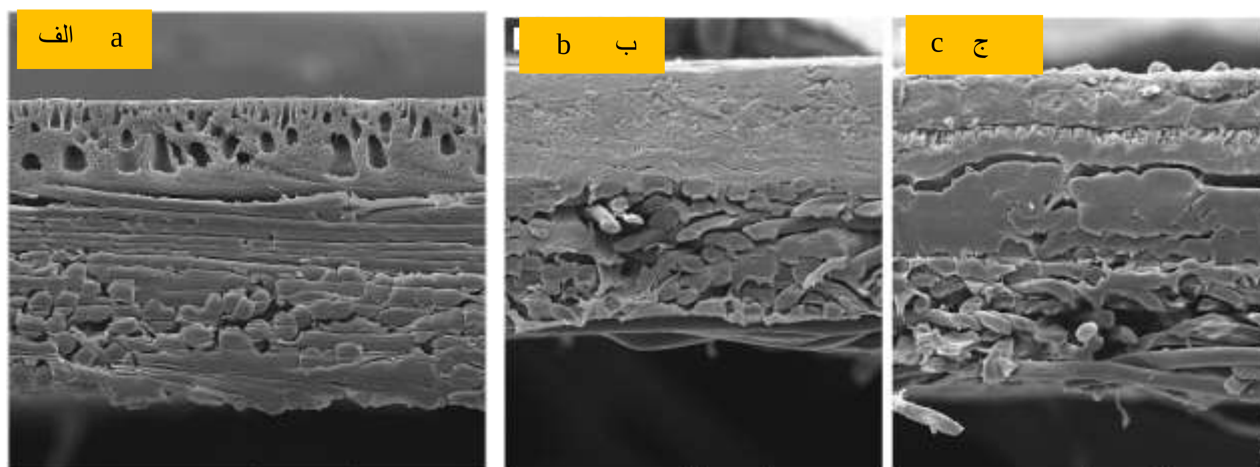
شکل ۵- اثرات الف) فشار، ب) سرعت جریان، ج) سرعت دوران تیغه، د) فاصله تیغه از سطح غشا بر شاخص گرفتگی (i) در فرایند فراپالایش آب سیب به کمک سامانه سطح تراش

Fig. 5- Effects of a: TMP, b: FFR, c: blade speed and d: blade distance from membrane surface on fouling index (i) during ultrafiltration of apple juice with scraped surface unit

مطالعات ریزساختاری غشا

برای بررسی ریزساختاری گرفتگی غشا، سطح مقطع عرضی غشاهای تازه و فرایند شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۶۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۶-a سطح مقطع غشاء تازه را قبل از فرآیند نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تمام منافذ باز هستند و هیچ لایه اضافی روی سطح غشا دیده نمی‌شود. پس از فرایند شفاف‌سازی غشایی آب سیب، سطح مقطع آن مجدداً مورد بررسی قرار گرفت که تصاویر آن در شکل ۶-b و شکل ۶-c به‌ترتیب برای در حالت با چرخش و بدون چرخش تیغه قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت بدون چرخش تیغه، تجمع ذرات کیک بر روی سطح غشاء ضخیم‌تر و متراکم‌تر از حالت با چرخش تیغه است. از طرف دیگر، ضخامت کم لایه کیک تشکیل شده بر روی سطح غشاء در فرآیند با چرخش تیغه به دلیل تلاطم‌های حاصل از تیغه چرخان است. این مشاهدات نتایج حاصل از

مدل هرمیا در بخش‌های قبل را تایید می‌کند. منافذ مسدود شده و لایه ای از ذرات رسوب کرده توسط وارچوک و همکاران (Warczok *et al.*, 2004) با استفاده از SEM طی فرایند نانوفیلتراسیون در طول تغلیظ آب سیب مشاهده شد. گولک و همکاران (Gulec *et al.*, 2017) گرفتگی غشایی را در فراپالایش آب سیب تجزیه و تحلیل کردند. آنها زبری سطح غشا را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند که غشاهایی با سطح آبگریزتر و زبرتر پتانسیل گرفتگی بالاتری نسبت به غشاهایی با سطح آبدوست و صاف برخوردار بودند.



شکل ٦- برش عرضی غشاء با بزرگنمایی ٦٠٠ الف): غشای تازه قبل از فرآیند، ب) غشا بعد از فرآیند UF با چرخش تیغه ج) غشا بعد از فرآیند UF بدون چرخش تیغه

Fig. 6- Cross-sectional view of the membrane (a: before the process, b: after the process in rotating blade mode and c: after the process in non-rotation mode)

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصله چرخش تیغه تأثیر مثبت و معناداری بر افزایش VCF فرایند داشته است. مکانیسم گرفتگی غالب در فرآیند فراپالایش آب سیب به کمک سامانه سطح تراش در اکثر شرایط تشکیل لایه کیک بود، اما با افزایش سرعت چرخش تیغه‌ها و به دلیل ایجاد تلاطم در جریان و در نتیجه کاهش ضخامت لایه کیک در سطح غشا و نفوذ ذرات ریز به داخل منافذ آن، نوع گرفتگی از تشکیل لایه کیک به بلوکه شدن‌های میانی، استاندارد و کامل تغییر می‌کند. همچنین مطالعات مقاومت‌های مختلف نشان داد که مقاومت کل و مقاومت کیک با چرخش تیغه کاهش یافت. در نتیجه، شرایط ۰/۵TMP بار، FFR ۱۰ میلی‌لیتر بر ثانیه، سرعت چرخش تیغه ۶۰۰ دور در دقیقه و فاصله تیغه ۲ میلی‌متر از سطح غشا به‌عنوان بهترین شرایط از لحاظ عملکرد گرفتگی غشایی و راندمان فرایند برای فراپالایش آب سیب با استفاده از سامانه سطح تراش معرفی شد.

منابع

1. Aguiar, I.B., Miranda, N.G., Gomes, F.S., Santos, M.C., de GC Freitas, D., Tonon, R.V., & Cabral, L.M. (2012). Physicochemical and sensory properties of apple juice concentrated by reverse osmosis and osmotic evaporation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *16*, 137-142. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.05.003
2. Ahmad, S., Marson, G.V., Zeb, W., Rehman, W.U., Younas, M., Farrukh, S., & Rezakazemi, M. (2020). Mass transfer modelling of hollow fiber membrane contactor for apple juice concentration using osmotic membrane distillation. *Seperation and Purification Technology*, *250*, 117209. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117209
3. Aliasghari Aghdam, M., Mirsaeedghazi, H., Aboonajmi, M., & Kianmehr, M.H. (2015). Effect of ultrasound on different mechanisms of fouling during membrane clarification of pomegranate juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *30*, 127–131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.05.008
4. Bahçeci, K.S. (2012). Effects of pretreatment and various operating parameters on permeate flux and quality during ultrafiltration of apple juice. *International Journal of Food Science & Technology*, *47*(2), 315–324. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02841.x

5. Bhattacharjee, C., Saxena, V.K., & Dutta, S. (2017a). Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *43*, 136–153. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002
6. Bhattacharjee, C., Saxena, V.K., & Dutta, S. (2017b). Watermelon juice concentration using ultrafiltration: Analysis of sugar and ascorbic acid. *Food Science and Technology International*, *23*(7), 637–645. https://doi.org/10.1177/1082013217714672
7. Cai, M., Xie, C., Lv, Y., Yang, K., & Sun, P. (2020). Changes in physicochemical profiles and quality of apple juice treated by ultrafiltration and during its storage. *Food Science & Nutrition*, *8*(6), 2913–2919. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.1593
8. Candrawinata, V.I., Golding, J.B., Roach, P.D., & Stathopoulos, C.E. (2013). From apple to juice—The fate of polyphenolic compounds. *Food Reviews International*, *29*(3), 276–293. https://doi.org/10.1080/87559129.2013.790049
9. Cassano, A., Conidi, C., & Drioli, E. (2018). Membrane-based operations and integrated membrane systems in fruit juice processing:, in: Drioli, E., Giorno, L., Macedonio, F. (Eds.), De Gruyter, pp. 255–288. https://doi.org/doi:10.1515/9783110281392-008
10. Cassano, A., Donato, L., & Drioli, E. (2007). Ultrafiltration of kiwifruit juice: Operating parameters, juice quality and membrane fouling. *Journal of Food Engineering*, *79*(2), 613–621. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.020
11. Castro-Muñoz, R. (2019). Separation, fractionation and concentration of high-added-value compounds from agro-food by-products through membrane-based technologies, in: Ferranti, P., Berry, E.M., Anderson, J. R. B. T.-E. of F. S. and S. (Eds.), . Elsevier, Oxford, pp. 465–476. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22282-8
12. Castro-Muñoz, R., Boczkaj, G., Gontarek, E., Cassano, A., & Fíla, V. (2020). Membrane technologies assisting plant-based and agro-food by-products processing: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technolgy*, *95*, 219–232. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.003
13. Castro-Muñoz, R., & Fíla, V. (2018). Membrane-based technologies as an emerging tool for separating high-added-value compounds from natural products. *Trends in Food Science & Technology*, *82*, 8–20. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.017
14. Cheng, M., Xie, X., Schmitz, P., & Fillaudeau, L. (2021). Extensive review about industrial and laboratory dynamic filtration modules: Scientific production, configurations and performances. *Seperation and Purification Technology*, *265*, 118293. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118293
15. Conidi, C., Castro-Muñoz, R., & Cassano, A. (2020). Membrane-based operations in the fruit juice processing industry: A Review. *Beverages*, *6*(1), 18. https://doi.org/10.3390/beverages6010018
16. De Barros, S.T.D., Andrade, C.M.G., Mendes, E.S., & Peres, L. (2003). Study of fouling mechanism in pineapple juice clarification by ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, *215*(1-2), 13–224. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00615-4
17. de Bruijn, J., & Bórquez, R. (2006). Analysis of the fouling mechanisms during cross-flow ultrafiltration of apple juice. *LWT-Food Science and Technology*, *39*(8), 861–871. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.06.014
18. de Oliveira, R.C., Docê, R.C., & de Barros, S.T.D. (2012). Clarification of passion fruit juice by microfiltration: Analyses of operating parameters, study of membrane fouling and juice quality. *Journal of Food Engineering*, *111*(2), 432–439. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.021
19. Dornier, M., Belleville, M.P., & Vaillant, F. (2018). Membrane technologies for fruit juice processing. In *Fruit preservation* (pp.211-248). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_8
20. Echavarría, A.P., Falguera, V., Torras, C., Berdún, C., Pagán, J., & Ibarz, A. (2012). Ultrafiltration and reverse osmosis for clarification and concentration of fruit juices at pilot plant scale. *LWT-Food Science and Technology*, *46*(1), 189–195. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.008
21. Echavarría, A.P., Torras, C., Pagán, J., & Ibarz, A. (2011). Fruit juice processing and membrane technology application. *Food Engineering. Reviews*, *3*(3), 136–158. https://doi.org/10.1007/s12393-011-9042-8
22. Fao, I.F.A.D., & UNICEF, W. (2017). The state of food security and nutrition in the world. *Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
23. Fuenmayor, C.A., Lemma, S.M., Mannino, S., Mimmo, T., & Scampicchio, M. (2014). Filtration of apple juice by nylon nanofibrous membranes. *Journal of Food Engineering*, *122*, 110–116. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.038
24. Fukumoto, L.R., Delaquis, P., & Girard, B. (1998). Microfiltration and Ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification. *Journal of Food Science*, *63*(5), 845–850. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb17912.x

25. Gökmen, V., & Çetinkaya, Ö. (2007). Effect of pretreatment with gelatin and bentonite on permeate flux and fouling layer resistance during apple juice ultrafiltration. *Journal of food engineering*, *80*(1), 300–305. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.060
26. Gulec, H.A., Bagci, P.O., & Bagci, U. (2017). Clarification of apple juice using polymeric ultrafiltration membranes: A comparative evaluation of membrane fouling and juice quality. *Food and Bioprocess Technology*, *10*(5), 875–885. https://doi.org/10.1007/s11947-017-1871-x
27. Gulec, H.A., Bagci, P.O., & Bagci, U. (2018). Performance enhancement of ultrafiltration in apple juice clarification via low-pressure oxygen plasma: A comparative evaluation versus pre-flocculation treatment. *LWT*, *91*, 511–517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.082
28. He, Y., Ji, Z., & Li, S. (2007). Effective clarification of apple juice using membrane filtration without enzyme and pasteurization pretreatment. *Sepration and Purification Technology*, *57*(2), 366–373. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.025
29. Hemmati, A., Mirsaeedghazi, H., & Aboonajmi, M. (2021). The effect of ultrasound treatment on the efficiency of membrane clarification of carrot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(1), e15001. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.15001
30. Hermia, J. (1982). Constant pressure blocking filtration laws: application to power-law non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering*, *60*(3), 183–187.
31. Hojjatpanah, G., Emam-Djomeh, Z., Ashtari, A.K., Mirsaeedghazi, H., & Omid, M. (2011). Evaluation of the fouling phenomenon in the membrane clarification of black mulberry juice. *International Journal of Food Science & Technology*, *46*(7), 1538-1544. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02651.x
32. Ilame, S.A., & Singh, S. (2015). Application of membrane separation in fruit and vegetable juice processing: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *55*(7), 964–987. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.679979
33. Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Nasab, F.K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modeling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, *246*, 118997. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997
34. Laurio, M.V.O., Yenkie, K.M., & Slater, C.S. (2021). Optimization of vibratory nanofiltration for sustainable coffee extract concentration via response surface methodology. *Separation Science and Technology*, 1–19. https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1879858
35. Lu, C., Bao, Y., & Huang, J.Y. (2021). Fouling in membrane filtration for juice processing. *Current Opinion in Food Science*, *42*, 76–85. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.004
36. Luo, J., Zhu, Z., Ding, L., Bals, O., Wan, Y., Jaffrin, M.Y., & Vorobiev, E. (2013). Flux behavior in clarification of chicory juice by high-shear membrane filtration: evidence for threshold flux. *Journal of Membrane Science*, *435*, 120–129. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.057
37. Massini, L., Rico, D., & Martin-Diana, A.B. (2018). Chapter 4- Quality attributes of apple juice: Role and effect of phenolic compounds. In *Fruit Juices* (pp. 45-47). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00004-7
38. Mirsaeedghazi, H., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S.M., Aroujalian, A., & Navidbakhsh, M. (2010). Clarification of pomegranate juice by microfiltration with PVDF membranes. *Desalination*, *264*(3), 243-248. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.031
39. Nandi, B.K., Das, B., & Uppaluri, R. (2012). Clarification of orange juice using ceramic membrane and evaluation of fouling mechanism. *Journal of Food Process Engineering*, *35*(3), 403–423. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00597.x
40. Nourbakhsh, H., Emam-Djomeh, Z., Mirsaeedghazi, H., Omid, M., & Moieni, S. (2014). Study of different fouling mechanisms during membrane clarification of red plum juice. *International Journal of Food Science & Technology*, *49*(1), 58-64. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijfs.12274
41. Onsekizoglu, P., Bahceci, K.S., & Acar, M.J. (2010). Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assessment. *Journal of Membrane Science*, *352*(1-2), 160–165. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.004
42. Rai, P., Majumdar, G.C., Gupta, S.D., & De, S. (2007). Effect of various pretreatment methods on permeate flux and quality during ultrafiltration of mosambi juice. *Journal of Food Engineering*, *78*(2), 561-568. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.024
43. Salehinia, S., Mirsaeedghazi, H., & Khashehchi, M. (2021). The effect of laser on the efficiency of membrane clarification of pomegranate juice. *Journal of Food Science and Technology*, *58*(5), 1682–1692. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04678-x

44. Sarkar, B. (2015). Enhanced cross-flow ultrafiltration of apple juice using electric field. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(6), 1372–1384. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.12356
45. Sarlaki, E., Paghaleh, A.S., Kianmehr, M.H., & Vakilian, K.A. (2020). Chemical, spectral and morphological characterization of humic acids extracted and membrane purified from lignite. *Chemistry and Chemical Engineering*, *14*(3), 353–361. https://doi.org/10.23939/chcht14.03.353
46. Szerencsés, S.G., Beszédes, S., László, Z., Veréb, G., Szalay, D., Hovorkáné Horváth, Z., Hodúr, C., Rákhely, G., & Kertész, S. (2021). Assessment of vibration amplitude and transmembrane pressure on vibratory shear enhanced membrane filtration for treating dairy wastewater. *Acta Alimentaria*, *50*(1), 42–53. https://doi.org/10.1556/066.2020.00123
47. Verma, S.P., & Sarkar, B. (2015). Analysis of flux decline during ultrafiltration of apple juice in a batch cell. *Food and Bioproducts Processing*, *94*, 147–157. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.03.002
48. Vladisavljević, G.T., Vukosavljević, P., & Bukvić, B. (2003). Permeate flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes. *Journal of Food Engineering*, *60*(3), 241–247. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00044-X
49. Warczok, J., Ferrando, M., López, F., & Güell, C. (2004). Concentration of apple and pear juices by nanofiltration at low pressures. *Journal of Food Engineering*, *63*(1), 63–70. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00283-8
50. Yazdanshenas, M., Tabatabaeenezhad, A.R., Roostaazad, R., & Khoshfetrat, A.B. (2005). Full scale analysis of apple juice ultrafiltration and optimization of diafiltration. *Separation and Purification Technology*, *47*(1-2), 52–57. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.06.004
51. Zarouk, S., Mirsaeedghazi, H., & Massah, J. (2020). The effect of magnetic field on efficiency and fouling mechanisms during membrane clarification of pomegranate juice. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering(IJCCE).* https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.123797.4057
52. Zhang, W., Ding, L., Grimi, N., Jaffrin, M.Y., & Tang, B. (2017). Application of UF-RDM (Ultafiltration Rotating Disk Membrane) module for separation and concentration of leaf protein from alfalfa juice: Optimization of operation conditions. *Separation and Purification Technology*, *175*, 365–375. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.059
53. Zhao, L., Wang, Y., Qiu, D., & Liao, X. (2014). Effect of ultrafiltration combined with high-pressure processing on safety and quality features of fresh apple juice. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(11), 3246–3258. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1307-9
54. Zhu, Z., Ladeg, S., Ding, L., Bals, O., Moulai-Mostefa, N., Jaffrin, M.Y., & Vorobiev, E. (2014). Study of rotating disk assisted dead-end filtration of chicory juice and its performance optimization. *Industrial Crops and Products*, *53*, 154–162. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.030
55. Zhu, Z., Luo, J., Ding, L., Bals, O., Jaffrin, M.Y., & Vorobiev, E. (2013). Chicory juice clarification by membrane filtration using rotating disk module. *Journal of Food Engineering*, *115*(2), 264–271. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.028
56. Zhu, Z., Mhemdi, H., Zhang, W., Ding, L., Bals, O., Jaffrin, M.Y., Grimi, N., & Vorobiev, E. (2016). Rotating disk-assisted cross-flow ultrafiltration of sugar beet juice. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(3), 493–500. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1644-3